

# PENGARUH KONVEKSI MOLEKUL TERHADAP DISTRIBUSI WAKTU TINGGAL

Putut Irwan Pudjiono

Puslitbang Kimia Terapan, LIPI  
Jl. Sangkuriang, Bandung 40135

## INTISARI

Pengaruh aliran konveksi terhadap hasil Distribusi Waktu Tinggal (DWT) dipelajari menggunakan alat aliran Couette ('Couette flow device') tegak yang dioperasikan secara sinambung. Telaah DWT dilakukan dengan pengamatan analisis kurva-C yang diperoleh dengan teknik masukan kedut dan untuk pengamatan luarannya digunakan teknik mixing cup. Percobaan dijalankan pada difusifitas molekul yang dapat diabaikan dan suhunya dipertahankan pada 20°C menggunakan dietilen alkohol (DEG) sebagai cairan yang mengalir dan larutan zat warna Congo red 1% dalam DEG sebagai pelacak yang disuntikkan dari bagian dasar bejana peralatan yang dipakai. Analisis teoritis terhadap kurva-C dikembangkan dari persamaan-persamaan aliran dalam celah anulus. Pendekatan ini dilakukan dengan dasar bahwa pada kedua sistem, aliran dalam alat aliran Couette dan celah anulus, memiliki kesamaan dalam komponen aliran aksialnya. Timbulnya aliran sekunder yang berupa pusaran akibat putaran silinder diharapkan terlihat sebagai perubahan bentuk kurva menjadi bentuk distribusi normal.

## ABSTRACT

Residence Time Distribution studies were performed in a continuous vertical Couette Flow device under the conditions of negligible molecular diffusion. Most of the experiments were carried out in the laminar flow region. Diethylene glycol (DEG, 'Analar grade', BDH, Poole) were used as the flowing fluid. 1% Congo red dye solution in DEG was used as the tracer and it was injected as an impulse input through the injection port situated at the bottom of the device. The temperature was maintained at 20°C during the course of the experiments. The responses were analyzed using the mixing cup technique. The C-curves obtained were analyzed theoretically using the equation originally derived for flow through annulus. Such an approach was applied since both Couette and annular flow device have similar geometry. The responses of the secondary flow induced by the cylinder rotation at  $Ta > Ta_c$  were expected to be observed as the curve change from the curve characterizes the laminar flow through annulus to normal distribution.

## PENDAHULUAN

Distribusi Waktu Tinggal (DWT) dalam reaktor merupakan salah satu informasi yang diperlukan untuk mengevaluasi unjuk kerja atau sifat-sifat suatu reaktor sinambung. DWT tersebut sangat ditentukan terutama oleh jenis reaktor dan pola aliran yang terbentuk. Aliran ideal untuk reaktor pipa adalah aliran sumbat dimana pencampuran ke arah radial dapat berlangsung dengan baik. Hingga kini belum ada model ataupun hasil percobaan yang dapat menjelaskan secara visual tentang perubahan bentuk kurva DWT akibat perubahan sifat aliran dari aliran laminar ke aliran dengan aliran pusar, misalnya dalam hal ini aliran laminar pusar.

Dalam makalah ini dibahas perubahan distribusi waktu tinggal akibat perubahan aliran dalam alat. Percobaan dijalankan dalam alat aliran Couette sinambung pada daerah laminar dengan elemen laju alir sejajar sumbu silinder. Pola aliran dalam alat dapat diatur dengan mengatur laju perputaran silinder dalam sedangkan silinder luarnya diam. Bahan yang digunakan adalah dietilen glikol (DEG) sebagai cairan sinambung dan pewarna congo red sebagai pelacak. Dengan difusifitas molekul pewarna dalam DEG kecil, dispersi pewarna hanya ditentukan oleh profil aliran konveksi yang terbentuk.

Analisa DWT dilakukan dengan membandingkan kurva-C [1] teoritis dan hasil percobaan yang diperoleh. Kurva-C teoritis dikembangkan berdasarkan model yang dikembangkan dari aliran dalam celah anulus. Persamaan-persamaan untuk aliran dalam celah anulus tersebut telah diberikan oleh Nigam dan Vasudewa [3] yang kemudian dikoreksi oleh Pudjiono dkk [2].

Kurva-C dari percobaan diperoleh dari pengamatan konsentrasi pewarna yang diinjeksikan ke dalam aliran sinambung secara masukan kedut ('impuls input') atau fungsi delta [1].

Kurva-C yang diperoleh dari percobaan di daerah aliran laminar ( $Ta < Ta_c$ ) memiliki puncak di daerah  $\theta_{min} = 0.67$  dan menurun mendekati harga 0 dengan  $\theta$  atau waktu. Sifat ini merupakan sifat kurva-C teoritis. Pada  $Ta > Ta_c$ , bentuk kurva berubah mengarah ke distribusi normal. Hal ini



menunjukkan bahwa aliran laminar telah terganggu stabilitasnya yang dalam hal ini disebabkan oleh terbentuknya aliran pusar.

## PERALATAN

Percobaan dijalankan dengan menggunakan rangkaian alat seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Bagian utama peralatan terdiri atas alat aliran Couette, rangkaian pengumpan dan sistem pengontrol suhu. Alat aliran Couette yang digunakan merupakan sistem dua buah silinder yang dipasang sesumbu ('concentric'). Silinder luar terbuat dari pipa perspex yang tembus pandang dengan diameter dalam 51 mm. Silinder dalamnya terbuat dari pipa stainless steel dengan diameter luar 48 mm. Permukaan luar silinder ini dipoles dengan hati-hati agar rata dan licin. Poros putar silinder dalam terbuat dari pipa stainless steel dengan diameter 20 mm. Pipa poros putar dan silinder dalam dihubungkan dengan penyambungan las. Penyambungan ini dibuat sedemikian rupa sehingga terbentuk rongga atau saluran di dalamnya yang dapat dialiri air. Putaran silinder dalam ini dapat menimbulkan aliran ke arah sejajar permukaan silinder dan ke arah aksial pada cairan yang diletakkan dalam celah anular yang terbentuk diantara silinder luar dan silinder dalam. Penjelasan sifat-sifat aliran yang ditimbulkan oleh putaran silinder ini diberikan dalam beberapa publikasi [lihat 2 dan 4].

Lubang pemasukan dan pengeluaran cairan dipasang berturut-turut di bagian bawah dan atas silinder luar. Keduanya terbuat dari pipa perspex yang berbeda ukurannya. Diameter dalam lubang pemasukannya 4 mm sedang lubang pengeluarannya berdiameter 10 mm. Pengeluaran cairan dari alat aliran Couette melalui lubang pengeluaran ini berlangsung secara limpahan.

Rangkaian pengumpan terdiri atas pompa peristaltik, tangki tinggi tekan tetap, rotameter dan kerangan jarum yang semuanya dihubungkan dengan slang silikon dengan ukuran seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Dengan rangkaian demikian pengumpanan cairan ke dalam reaktor dapat dilakukan secara sinambung dengan laju tetap dan bebas denyutan.

Suhu cairan dalam alat aliran Couette dapat dijaga tetap selama percobaan berlangsung menggunakan penangas air suhu tetap. Air dari penangas ini disirkulasi melalui silinder dalam pada laju yang cukup tinggi. Suhu cairan yang akan diumpankan ke dalam reaktor diatur dengan cara melewati cairan melalui saluran yang direndam dalam penangas air.

## BAHAN DAN METODA

Cairan yang dialirkan secara sinambung melalui alat aliran Couette adalah dietilen glikol (DEG, pro analisis). Cairan ini diumpankan ke dalam reaktor melalui lubang pemasukan yang terletak di bagian bawah reaktor pada laju

tetap dan dikeluarkan dari lubang pelimpahan di bagian atas. Penggerak aliran ke arah radial dapat ditimbulkan dengan memutar silinder bagian dalam pada laju tertentu. Sistem yang demikian dikenal dengan sistem aliran Couette.

Laju alir yang ditinjau dalam percobaan ini adalah 0,050-0,077 cm<sup>3</sup>/detik. Laju alir tersebut menghasilkan waktu tinggal rata-rata ( $\bar{t}$ ) antara 660 sampai 1020 detik atau bilangan Reynolds aksial (Re) antara 1,8 sampai 5,5. Putaran silinder yang dipelajari adalah 0-0,83 putaran per detik (Hz) yang menghasilkan bilangan Taylor (Ta) antara 0 sampai 82,5. Percobaan pada 0 Hz juga dilakukan untuk memeriksa apakah model aliran dalam anulus dapat dipakai untuk percobaan ini.

Setelah alirannya stabil, sebanyak 0,4 cm<sup>3</sup> larutan pewarna diinjeksikan ke dalam reaktor. Pewarna yang digunakan adalah larutan pewarna 'congo red' dalam DEG dengan konsentrasi 1%. Difusifitas pewarna 'congo red' dalam DEG adalah  $0,190 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/detik sehingga pengaruh difusi terhadap proses dispersi dapat diabaikan [lihat 5 dan 2]. Penginjeksian pewarna ke dalam aliran sinambung dilakukan dalam waktu 3 detik. Waktu penginjeksian ini jauh lebih kecil jika dibandingkan terhadap harga  $\bar{t}$  yang ditinjau.

Cuplikan diambil dengan cara menampung limpahan dari alat aliran Couette menggunakan botol-botol kecil. Botol penampung diganti dengan yang baru setiap 0,02  $\bar{t}$ . Pengambilan cuplikan ini dimulai sejak 0,5  $\bar{t}$  sampai 3,5  $\bar{t}$ . Konsentrasi pewarna dalam cuplikan ditentukan secara spektrofotometri.

## PENGEMBANGAN ANALISA TEORITIS UNTUK KURVA-C

Metoda yang dapat digunakan untuk menganalisa DWT ditentukan oleh profil aliran yang terbentuk dalam reaktor. Untuk aliran laminar dengan elemen-elemen kecepatan ('velocity elements') yang terdefinisi, analisa dilakukan menggunakan model profil kecepatan atau konvektif [6]. Dalam model ini digunakan persamaan yang menjelaskan distribusi aliran untuk menentukan DWT teoritis.

Aliran fluida yang terbentuk dalam alat aliran Couette dikarakterisasi oleh bilangan Taylor (Ta) yang besarnya ditentukan oleh laju putaran silinder, sifat fluida dan geometri alat [3,7 dan 8]. Aliran laminar terbentuk di daerah Ta rendah. Dalam alat aliran Couette yang dioperasikan secara curah, elemen-elemen aliran laminar sejajar dengan permukaan silinder.

Lintasan aliran laminar dalam alat aliran Couette yang dijalankan secara sinambung berbentuk helik atau spiral. Penampang aliran yang menyilang permukaannya serupa dengan penampang aliran laminar dalam celah anulus [9]. Dengan demikian, lintasan spiral yang berada di dekat dinding memiliki komponen kecepatan aksial terendah



sedang posisi spiral yang memiliki kecepatan aksial tertinggi ditentukan oleh geometri alat.

Pusaran-pusaran ke arah radial terbentuk dalam alat aliran Couette pada harga  $Ta$  di atas harga tertentu. Aliran dengan pusaran yang ditimbulkan oleh putaran silinder tersebut memiliki sifat-sifat yang berbeda dengan aliran laminar pada  $Ta$  rendah. Harga  $Ta$  yang merupakan pembatas antara dua bentuk aliran tersebut disebut bilangan Taylor kritis,  $Ta_c$  [6,7 dan 8].

Untuk aliran cairan tak termampatkan ('incompressible') dalam celah anulus, dua komponen kecepatan yang terdiri atas  $v_\theta$  dan  $v_z$  dalam koordinat silinder dari aliran yang berbentuk helik melalui celah anulus adalah [10]:

$$v_\theta = \frac{\omega \alpha R (1/x - x)}{(1/\alpha - \alpha)} \quad (1)$$

dan

$$v_z = \frac{(\Delta P) R^2}{4\mu L} [1 - x^2 + 2\lambda^2 \ln(x)] \quad (2)$$

dimana:  $x = r/R$  (3)

dan

$$\lambda = \left[ \frac{(1 - \alpha^2)}{2 \ln(1/\alpha)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Kurva-F [1] dalam aliran anulus dapat dinyatakan sebagai [3]:

$$\begin{aligned} F &= \frac{\int 2\pi v_z R^4 x dx}{Q} \\ &= \frac{4}{[1 - \alpha^4 - 2\lambda^2(1 - \alpha^2)]} \int_x^{\ddot{x}} [1 - x^2 + 2\lambda^2 \ln(x)] x dx \quad (5) \end{aligned}$$

dimana  $Q$  adalah laju alir volumetrik melalui anulus yang didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi(4P)R^4}{8\mu L} [1 - \alpha^4 - 2\lambda^2(1 - \alpha^2)] \\ &= \frac{2\pi v_z R^2 x dx}{[1 - \alpha^4 - 2\lambda^2(1 - \alpha^2)]} \int [1 - x^2 + 2\lambda^2 \ln(x)] x dx \quad (6) \end{aligned}$$

Kondisi batas untuk persamaan (6) adalah posisi dimana harga-harga  $v_z$  ke arah radial sama. Untuk mendapatkan kondisi batas ini dapat digunakan persamaan [3]:

$$\ddot{x}^2 - 2\lambda^2 \ln \ddot{x} = x^2 - 2\lambda^2 \ln x \quad (7)$$

Dengan menggunakan definisi laju alir aksial rata-rata yang didefinisikan sebagai  $Q/L$  dan  $v_z$ , waktu tinggal tak berdimensinya dapat dinyatakan sebagai:

$$\theta = 1/2 \left[ \frac{1 + \alpha^2 + 2\lambda^2}{1 - x^2 + 2\alpha^2 \ln \alpha} \right] \quad (8)$$

dan

$$\theta_{\min} = 1/2 \left[ \frac{1 + \alpha^2 + 2\alpha^2}{1 - \lambda^2 + 2\lambda^2 \ln \lambda} \right] \quad (9)$$

Integrasi terhadap persamaan (6) menghasilkan:

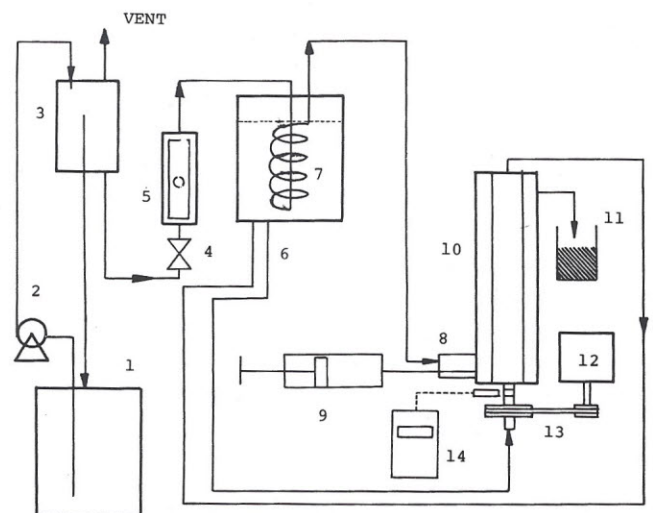
$$F = \frac{1}{[1 - \alpha^4 - 2\lambda^2(1 - \alpha^2)]} \left\{ \frac{\ddot{x}^2 - x^2}{2} - \frac{\ddot{x}^4 - x^4}{4} + 2\lambda^2 \left[ \ddot{x}^2/4 (2 \ln \ddot{x} - 1) - x^2/4 (2 \ln x - 1) \right] \right\} \quad (10)$$

Persamaan untuk kurva-C dapat diturunkan dari persamaan (7), (8) dan (10) sebagai berikut:

$$C = \frac{dF}{d\theta} = \frac{dF}{dx} \frac{dx}{d\theta} \quad (11)$$

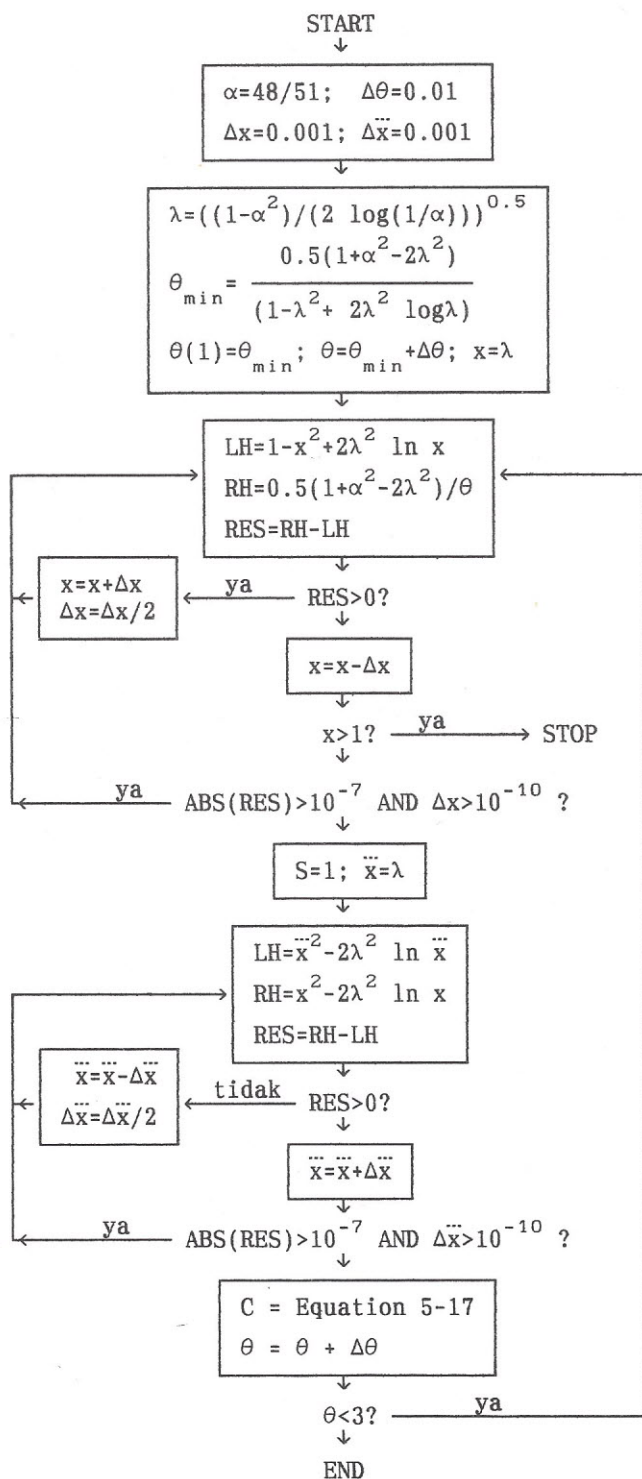
$$4 [1 - x^2 + 2\lambda^2 \ln(x)] \left[ \frac{\ddot{x} - x}{x - \ddot{x}} - \frac{x^2(\ddot{x}^2 - \lambda^2)(1 - x^2 + 2\lambda^2 \ln x)}{1 - \lambda^2 + 2\lambda^2 \ln \lambda} + 2\lambda^2 \ln \ddot{x} \right] \frac{1}{[(1 - \alpha^2)(1 + \alpha^2 - 2\lambda^2)(\ddot{x} - \lambda^2)/x]} \quad (11)$$

Penyelesaian simultan persamaan-persamaan di atas dilakukan dengan langkah-langkah seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.



- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| 1. Stock DEG                 | 8. Tempat pemasangan         |
| 2. Pompa peristaltik         | 9. Penginjeksi pewarna       |
| 3. Tangki tinggi tekan tetap | 10. Alat aliran Couette      |
| 4. Keranjaran jarum          | 11. Pengumpul cuplikan       |
| 5. Rotameter                 | 12. Motor elektrik           |
| 6. Penangas air              | 13. Puli dan sabuk penggerak |
| 7. Koli penukar panas        | 14. Tachometer optis         |

Gambar 1. Peralatan untuk percobaan distribusi waktu tinggal.

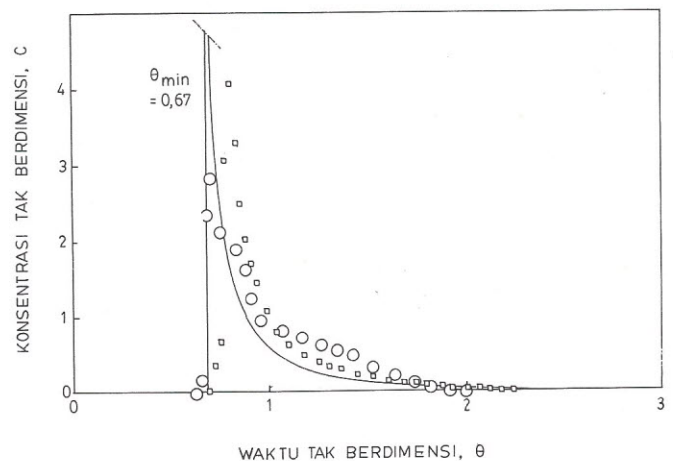


Gambar 2. Diagram metoda coba-ulang yang digunakan dalam penentuan konsentrasi tak berdimensi (kurva-C)

## HASIL DAN DISKUSI

Kurva dengan garis utuh pada Gambar 3 menunjukkan kurva-C teoritis untuk aliran laminar yang ditentukan

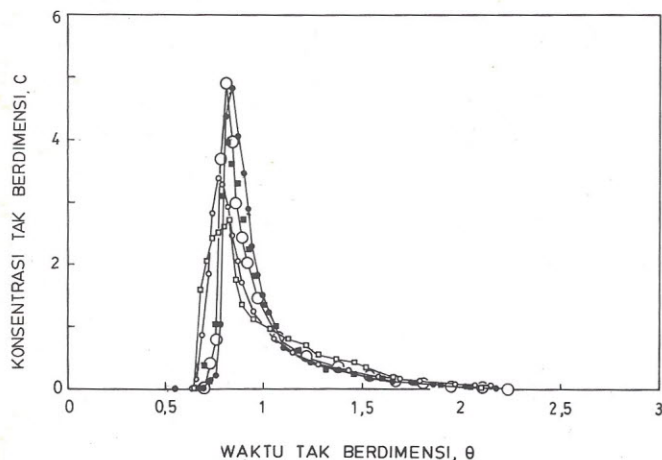
menggunakan metoda seperti yang dijelaskan dalam Gambar 2. Garis tegak dalam gambar tersebut ditentukan melalui perhitungan menggunakan persamaan untuk profil aliran dalam anulus [lihat 8]. Harga  $\theta$  minimum diperoleh dengan membagi jarak antara lubang pemasukan dan pengeluaran dengan kecepatan maksimum cairannya [9]. Kurva-C yang diperoleh menunjukkan bahwa pewarna mulai tampak dalam cuplikan yang terkumpul disekitar harga  $\theta$  minimum, dengan cepat mencapai harga maksimumnya dan kemudian menurun dengan waktu. Pola luaran yang demikian sesuai dengan bentuk kurva-C untuk aliran laminar [1 dan 5]. Dengan demikian, pada difusifitas molekul yang dapat diabaikan dan harga  $Ta \leq 13$  kurva-C dari alat aliran Couette mendekati kurva-C teoritis untuk aliran laminar dalam anulus. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan teoritis yang dilakukan untuk mengevaluasi hasil dari percobaan ini dapat diterima. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa pada harga  $Ta \leq 13$  aliran yang terbentuk masih laminar dengan profil aliran seperti aliran dalam celah anulus.



Gambar 3. Kesesuaian antara kurva-C dengan hasil pengamatan  $Ta=0$   
 (□)  $Re = 0,041$   
 (○)  $Re = 0,027$

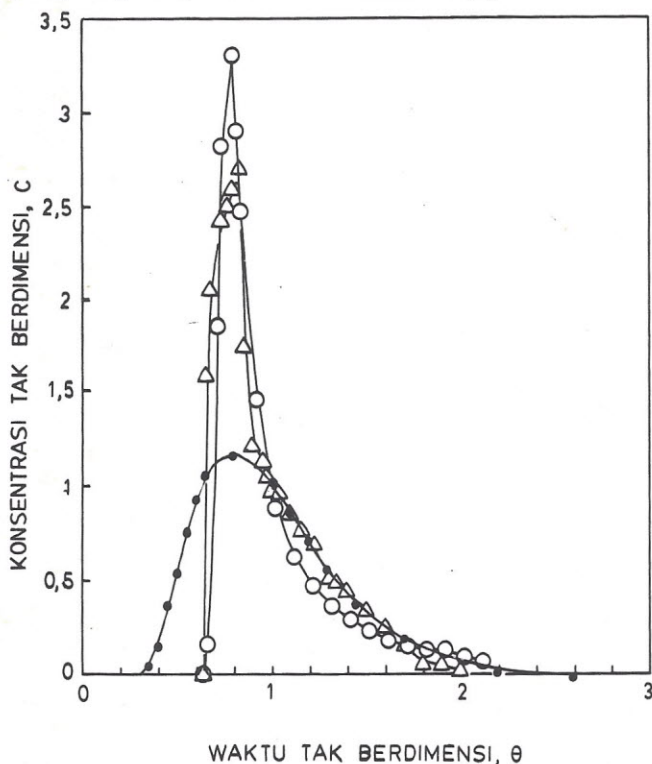
Gambar 4 menunjukkan bahwa putaran silinder ( $Ta > 0$ ) mengakibatkan puncak-puncak kurva menurun terhadap harga  $Ta$ . Meningginya kurva untuk harga  $Ta \geq 13$  dibanding dengan kurva yang diperoleh dari percobaan dengan  $Ta=0$  (putaran silinder = 0 Hz) mengisyaratkan bahwa putaran silinder menurunkan variasi dispersi aksial. Namun, kurva-C menurun puncaknya dan menjadi semakin lebar pada harga  $Ta$  yang lebih tinggi. Penurunan dispersi aksial ini kemungkinan disebabkan oleh semakin besarnya komponen aliran radial sehingga terbentuk kombinasi antara aliran anulus dan aliran yang sejajar dengan permukaan silinder (aliran Couette). Semakin tinggi  $Ta$  semakin nyata pengaruh aliran Couette ini. Keadaan ini juga dapat dihubungkan dengan semakin membaiknya kondisi pencampuran ke arah radial pada harga  $Ta$  yang lebih tinggi.





**Gambar 4.** Perubahan kurva-C pada daerah laminar terhadap harga  $Ta$   $Re = 0,041$   
 (□)  $Ta = 0$  (■)  $Ta = 18,5$   
 (●)  $Ta = 7,9$  (○)  $Ta = 26,5$   
 (○)  $Ta = 13,2$

Perubahan pola aliran dalam alat aliran Couette terlihat pada hasil yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Untuk sistem yang digunakan dalam percobaan ini, aliran sekunder terbentuk pada  $Ta > 60$  [2]. Walaupun aliran dalam pusaran masih laminar ('laminar vortex flow') perubahan DWT menunjukkan bahwa model konveksi yang merupakan model untuk aliran laminar sudah tidak sesuai lagi. Bentuk kurva-C untuk  $Ta > 60$  ini menandakan bahwa pencampuran ke arah radial menjadi nyata sehingga sistem berperilaku yang mengarah pada sistem aliran sumbat [1].



**Gambar 5.** Perubahan bentuk kurva-C akibat perubahan pola aliran  $Re = 0,041$   
 (Δ)  $Ta = 1,16$  (○)  $Ta = 3,87$  (●)  $Ta = 70$

## KESIMPULAN

1. Model konveksi untuk DWT sesuai untuk mengevaluasi hasil percobaan di daerah  $Ta < Ta_c$  yang merupakan daerah aliran laminar walaupun ada komponen aliran lain yang tidak sejajar dengan arah aliran curahnya ('bulk flow').
2. Aliran laminar dalam celah anulus dapat tergeser ke arah aliran sumbat dengan menimbulkan aliran dengan arah menyilang. Aliran silang dalam percobaan ini memiliki komponen sejajar dengan permukaan silinder atau ke arah kecepatan sudutnya dan ditimbulkan oleh putaran silinder (aliran Couette).
3. Semakin tinggi kecepatan aliran silang, distorsi terhadap aliran laminar dalam anulus semakin besar.

## NOTASI

A	=	Luas penampang aliran, cm
C	=	kurva-C = konsentrasi luaran tak berdimensi dari masukan kedut (impulse input)
e	=	lebar celah anulus, $e = R - R_i$ (cm)
F	=	kurva-F = konsentrasi luaran tak berdimensi dari masukan tangga (step input)
L	=	panjang alat aliran Couette (cm)
N	=	laju putaran silinder dalam (Hz)
Q	=	laju alir volume ( $\text{cm}^3/\text{detik}$ )
R	=	diameter dalam dari silinder luar (cm)
Re	=	bilangan Reynolds aksil. $Re = 2\rho Ue/\mu$
$R_i$	=	diameter luar dari silinder dalam (cm)
t	=	waktu (detik)
$\bar{t}$	=	waktu tinggal rata-rata, $\bar{t} = V/Q$ (detik)
$t'$	=	waktu respon rata-rata (detik)
$Ta$	=	bilangan Taylor, $Ta = (2\pi R_i e \rho N / \mu) (e/R_i)^{0,5}$
$Ta_c$	=	bilangan Taylor kritis yang merupakan batas antara aliran laminar dan laminar berpusar
U	=	kecepatan aksial rata-rata, cm/detik
$U_{maks}$	=	kecepatan tertinggi elemen aliran [lihat 9], cm/detik
$u_z$	=	kecepatan ke arah aksial (cm/detik)
$u_\theta$	=	kecepatan ke arah putaran (cm/detik)
V	=	volume ( $\text{cm}^3$ )
x, x	=	posisi ke arah radial pada kecepatan aksial yang sama
$\alpha$	=	perbandingan diameter luar dari silinder dalam terhadap diameter dalam dari silinder luar, $\alpha = R_i/R$
$\theta$	=	waktu tinggal tak berdimensi, $\theta = t/t'$
$\theta_{min}$	=	panjang lintasan aliran / ( $U_{maks} \cdot t'$ ) = volume alat / ( $U_{maks} \cdot A \cdot t'$ )
$\lambda$	=	jarak tak berdimensi dimana fluks momentum nol
$\mu$	=	viskositas cairan (mPa detik)
$\rho$	=	densiti cairan ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Bersambung ke halaman 45.